

Uma abordagem multidisciplinar para a avaliação sísmica do Edifício dos Brasões, Palácio Nacional de Sintra

A multi-disciplinary approach to the seismic assessment of the Brasões Building, National Palace of Sintra

Ana Silva
Rita Bento

Resumo

O Palácio Nacional de Sintra, uma estrutura complexa composta por diferentes edifícios de alvenaria, é um dos palácios mais antigos de Portugal. Para a avaliação sísmica do Palácio recorreu-se a uma abordagem multidisciplinar integrada. Uma vez que o Palácio é composto por várias unidades estruturais de interação mútua, a avaliação do seu desempenho sísmico foi desenvolvida para as diferentes unidades construtivas, considerando o efeito das estruturas adjacentes. Neste artigo é apresentado o estudo desenvolvido para o Edifício dos Brasões. Primeiro, começa-se por apresentar os resultados da investigação histórica desenvolvida. De seguida descreve-se o procedimento por varrimento laser, usado para a caracterização geométrica do edifício, e os testes de vibração ambiental desenvolvidos para a caracterização dinâmica do Edifício dos Brasões. Para a avaliação sísmica e a verificação da segurança estrutural do edifício adotaram-se diferentes abordagens para atender ao comportamento das paredes no plano e fora do plano. Os procedimentos utilizados para a avaliação estrutural são descritos e os modelos desenvolvidos são apresentados, assim como alguns dos resultados obtidos. Por razões de confidencialidade, os resultados finais do estudo não são apresentados.

Abstract

The National Palace of Sintra, a complex structure composed of different unreinforced masonry buildings, is one of the most ancient palaces in Portugal. In order to perform a complete and adequate seismic assessment of the Palace, a multi-disciplinary expertise collaboration was applied. Since the Palace is a complex structure composed of mutually interacting structural units, the seismic performance is developed for the different building units, considering the effect of the adjacent ones. In this paper the study developed for the Brasões Building is presented. First, an historical approach and a laser scanning campaign were conducted, before proceeding to ambient vibration tests for the dynamic characterization of the building. For the seismic assessment and the verification of the structural safety of the Brasões Building, different approaches were adopted to consider the in- and out-of-plane responses. The procedures used for the structural evaluation are described and the models developed presented, as well as some of the results obtained. For reasons of confidentiality, the final results of the study are not presented.

Palavras-chave: Abordagem multidisciplinar / Avaliação sísmica / Monumentos / Testes de caracterização dinâmica

Keywords: Multi-disciplinary approach / Seismic assessment / Monuments / Tests for dynamic characterization

Ana Silva

Mestre em Engenharia Civil
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
ana.maria.a.s@tecnico.ulisboa.pt

Rita Bento

Professora Associada com Agregação
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
rita.bento@tecnico.ulisboa.pt

1 Introdução

O Património Cultural Construído (PCC) permite adquirir um valor único de civilização ou de cultura e assume um papel relevante para a compreensão, permanência e construção da identidade nacional. Apesar de o PCC existente ter um importante potencial cultural e económico, tem-se revelado vulnerável e pouco resiliente a desastres naturais.

A análise estrutural e a avaliação sísmica de edifícios históricos e monumentais em alvenaria é, na grande maioria das situações, uma tarefa complexa que desafia o conhecimento técnico e científico em diferentes áreas do conhecimento e em particular na área da engenharia sísmica estrutural. A avaliação sísmica requer uma abordagem multidisciplinar integrada e exigente para lidar eficientemente com todas as etapas envolvidas: o conhecimento e a caracterização da estrutura, a análise estrutural subsequente (Figura 1) [1], e o potencial projeto de intervenção. Este foi o procedimento adotado para a avaliação da segurança sísmica do Palácio Nacional de Sintra (PNS) no estudo desenvolvido no âmbito do protocolo estabelecido entre o Instituto Superior Técnico (IST) e a empresa Parques de Sintra - Monte da Lua, S.A. (PSML) [2, 3, 4, 5].

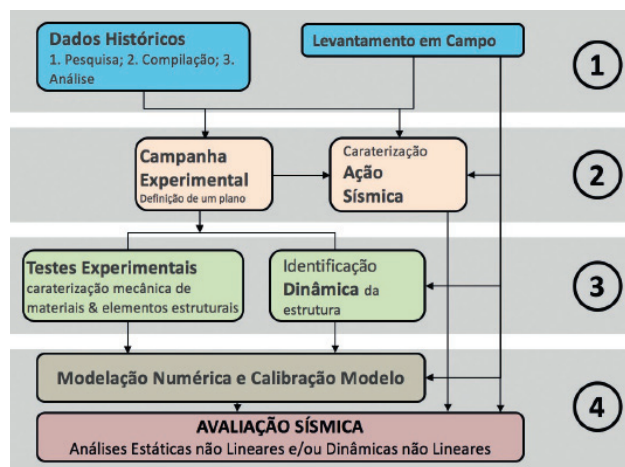


Figura 1 Abordagem multidisciplinar – etapas para a avaliação sísmica do Palácio Nacional de Sintra [1]

Neste artigo apresenta-se o estudo desenvolvido num dos edifícios do PNS: o edifício que contém a Sala dos Brasões [2, 6]. O artigo está organizado da seguinte forma: primeiramente, efetua-se uma breve descrição histórica do edifício; posteriormente aborda-se o procedimento efetuado para a caracterização geométrica e mecânica dos materiais (visitas *in situ* e trabalho experimental); segue-se a descrição dos procedimentos utilizados para a avaliação estrutural; por fim, apresentam-se os modelos desenvolvidos e alguns dos resultados obtidos, assim como, algumas considerações e recomendações importantes relacionadas com a modelação numérica e a avaliação sísmica. Por razões de confidencialidade, os resultados finais do estudo [2] não são apresentados.

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SILVA, A. [et al.] – Uma abordagem multidisciplinar para a avaliação sísmica do Edifício dos Brasões, Palácio Nacional de Sintra. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 14. ISSN 2183-8488. (novembro 2020) 97-110.

2 Enquadramento histórico

O Palácio Nacional de Sintra é constituído por alvenaria de pedra e encontra-se localizado no centro histórico da vila de Sintra, uma zona suscetível à perigosidade sísmica local. Sabe-se atualmente que a grande maioria dos edifícios de alvenaria de pedra em Portugal não estão preparados para responder adequadamente a ações sísmicas. Deste modo, é importante a avaliação da segurança do PCC existente e assegurar a sua conservação.

A história do Palácio Nacional de Sintra, um dos palácios mais antigos de Portugal e o único sobrevivente íntegro entre os paços reais medievais, é feita de “camadas” [7], uma vez que foi alvo de vários acrescentos e modificações ao longo dos vários séculos (Figura 2), tendo adquirido um valor histórico inegável. Sabe-se que foi D. João I e os seus sucessores até D. Manuel I, inclusive, que maior uso deram ao Palácio e que, durante os seus reinados, mais contribuíram para a aparência característica que ainda hoje ostenta.

O Palácio da Vila, assim conhecido por quem o visita, possui uma estruturação arquitetónica verdadeiramente original que transparece as diferentes épocas construtivas a que foi sujeito (Figura 2). A longevidade do Palácio, palco de alguns acontecimentos importantes da história de Portugal, faz dele uma testemunha viva dessa mesma história [8].

Localizada no ponto mais elevado do Palácio Nacional de Sintra, a Sala dos Brasões (caso de estudo) é o expoente máximo da intervenção manuelina no edifício (Figura 2) e a mais importante sala heráldica de toda a Europa, representando quase um templo da nobreza.

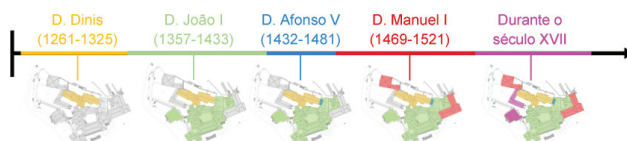


Figura 2 Planta do Palácio Nacional de Sintra com identificação das várias fases construtivas do mesmo e das respetivas salas que o caracterizam. Adaptado de [2, 3, 4]

A Sala dos Brasões (Figura 3) transpira o patriotismo do século XVI, quando os descobrimentos atingiram o auge da expansão portuguesa pelo mundo [7]. A decoração da sala surgiu da preocupação heráldica e genealógica de D. Manuel I, que expressa o jogo entre a intimidade e a representação do poder [8].

A Sala dos Brasões demonstra ser a maior contribuição que o rei D. Manuel I fez para o Palácio da Vila, um verdadeiro trono às conquistas portuguesas pelo mundo, onde homenageia todas as



Figura 3 Vistas da Sala dos Brasões do Palácio Nacional de Sintra

famílias que contribuíram para a prosperidade de Portugal. As formas geométricas adotadas (Figura 3), como o octógono, sinónimo de perfeição e beleza ideal, a orientação rigorosa da sala segundo os pontos cardeais e a decoração heráldica, corporizam a centralização do poder e o absolutismo do Estado [8].

3 Levantamento em campo – Caracterização geométrica

A criação de um modelo numérico, inerente à avaliação estrutural do PNS, exige a caracterização geométrica da construção existente o mais próximo da realidade possível. Deste modo, foi muito importante contemplar um conjunto de inspeções de avaliação estrutural e a caracterização tipológica dos elementos estruturais existentes. Efetuou-se o levantamento de dados em campo, uma fase decisiva para a caracterização construtiva e estrutural do PNS em geral e do Edifício dos Brasões em particular. O levantamento em campo iniciou-se com inúmeras visitas ao PNS, onde se procedeu ao levantamento manual de medidas e, sempre que necessário, a um levantamento topográfico [2] [4]. Posteriormente, o levantamento geométrico foi realizado a partir de um *laser scanner* Faro FocusS 70 (Figura 4) e de um drone Topcon Falcon 8+. Para o levantamento por Laser recorreu-se a uma resolução máxima de 1 mm a 70 m, que cobre um campo de visão de $360^\circ \times 300^\circ$ [5]. No edifício com a Sala dos Brasões (caso de estudo) foram utilizadas 333 estações de varrimento, distribuídas nos diferentes espaços (salas, jardins externos) e locais do ambiente circundante. As digitalizações deste caso de estudo incluem fotografia colorida já que contemplava salas visitáveis internas, salas com pormenores de interesse e áreas externas. As imagens em cores permitem detetar facilmente pormenores (por exemplo, fendas nas paredes). O parâmetro de qualidade do varrimento, que é simplesmente o número de repetições de medição para cada ponto, foi definido como três ou quatro, dependendo do tamanho da sala capturada em cada estação de varrimento.



Figura 4 Equipamento de levantamento geométrico (varrimento laser) com o Edifício dos Brasões ao fundo

O levantamento por varrimento laser é uma técnica recente de levantamentos 3D de alta precisão. O produto gerado é uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais referenciadas ao centro de fase do sensor, que, após processamento, gera uma nuvem de pontos georreferenciada que dependendo das características do equipamento pode ser enriquecida a cores [1]. Para o caso em estudo, a nuvem de pontos gerada (Figura 5) permitiu identificar perfeitamente a geometria do edifício, salientando-se a sua forma quadrangular e a altíssima cúpula característica da Sala dos Brasões.



Figura 5 Nuvem de pontos do Edifício dos Brasões obtida por levantamento geométrico com varrimento laser. Em cima, vista global do edifício com a Sala dos Brasões e em baixo, um corte estrutural no edifício com apresentação de algumas medidas estruturais

Este tipo de levantamento, pelo exterior e pelo interior das estruturas, permite a obtenção de um grande conjunto de dados, num curto período de tempo e com precisão elevada. Por exemplo, na imagem da direita da Figura 5 indicam-se os valores definidos para a altura dos diferentes pisos, espessura das colunas, determinados a partir da nuvem de pontos final, obtida a partir do levantamento pelo exterior e pelo interior do edifício. A nuvem de pontos final permite assim a reconstrução tridimensional completa e densa dos elementos levantados, o que possibilita a rápida criação de modelos arquitetónicos e estruturais. Permite obter o melhor levantamento possível em termos de precisão, integridade e confiabilidade, facilitando a aplicação de metodologias BIM (*Building Information Model*). Num contexto de reabilitação, a

utilização de metodologias BIM apresenta um amplo leque de oportunidades, onde se destaca o desenvolvimento de um arquivo digital para gestão de informação e apoio a projetos e obras de manutenção de património construído [1].

A metodologia adotada para o levantamento geométrico (por varrimento laser) permitiu a definição mais precisa da geometria de modelos numéricos 3D, reproduzindo, tanto quanto possível, as irregularidades geométricas e a complexidade do PNS.

4 Campanha experimental

4.1 Introdução

O desempenho estrutural dos edifícios de alvenaria está muito dependente das características da secção das paredes (simples ou compostas, grau de imbricamento, etc.) e dos materiais (qualidade da argamassa, dimensões das unidades, percentagem de vazios, estado de degradação, etc.). Apenas com a contribuição de um levantamento em campo da estrutura e da realização de diferentes ensaios experimentais foi possível obter a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais do PNS. Todos os parâmetros definidos para a caracterização mecânica dos materiais são posteriormente utilizados na avaliação de segurança das estruturas e no eventual estudo do seu reforço.

No estudo do PNS, realizaram-se diferentes testes experimentais *in situ* [2] [4] que permitiram a caracterização estrutural dos seus elementos: os ensaios semi-destrutivos de recolha de amostras e de macacos planos simples e duplos e os ensaios não destrutivos de deteção geotécnica por georadar (GPR – *Ground-Penetrating Radar*) e de identificação dinâmica (ensaios de vibração ambiental). Os testes foram realizados nas paredes estruturais principais, que caracterizam os períodos de construção do Palácio, e tendo em conta as várias condicionantes existentes nos edifícios, tais como a existência de pinturas e/ou azulejos nas paredes [2] [4]. Para o caso em estudo, o edifício que contém a Sala dos Brasões, apenas se realizaram os testes de identificação dinâmica (ensaios de vibração ambiental), que se descrevem de seguida.

4.2 Testes de identificação dinâmica

O modelo numérico do edifício que contém a Sala dos Brasões foi inicialmente desenvolvido no programa SAP2000 (Figura 6) [2, 6]; este modelo permitiu definir as posições dos sensores e o número de *setups* a realizar nos ensaios de vibração ambiental. Recorreram-se às configurações modais obtidas a partir do modelo numérico preliminar e identificaram-se nos primeiros modos de vibração fundamentais, os pontos com maior deslocamento e, consequentemente onde se sente maiores vibrações. Estes pontos correspondem aos locais apropriados para a localização dos acelerómetros (sensores).

A resposta do edifício às vibrações ambientais foi medida com acelerómetros de grande sensibilidade (80 V/g) do tipo force-balance com resposta dinâmica entre DC e 200 Hz. Mais especificamente, utilizaram-se, seis acelerómetros modelo EpiSensor ES-U2 (sensor uniaxial) e um acelerómetro modelo EpiSensor ES-T (sensor triaxial) da Kinemetrics Inc. [15, 16]. Os acelerómetros foram ligados por

meio de cabos de transmissão de sinal tipo Belden, a um sistema central de aquisição de dados, modelo Granite da Kinemetrics Inc. de 36 canais. O sistema constituído pelos acelerómetros e sistema de aquisição foi controlado, em campo, através do programa Rockhound [16] instalado num computador portátil. Todo o equipamento utilizado nestes testes de vibração ambiental pertence à empresa Teixeira Duarte, S.A.

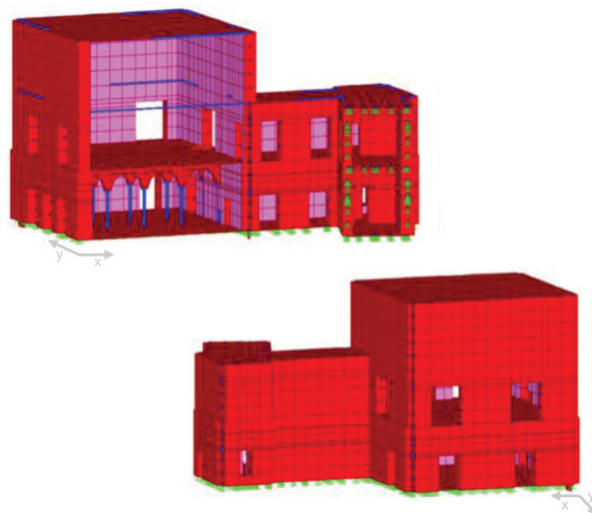


Figura 6 Modelo numérico do corpo da Sala dos Brasões desenvolvido no programa SAP2000

Deste modo, nos quatro cantos da Sala dos Brasões dispuseram-se sensores uniaxiais nas duas direções principais (X e Y), no interior da sala e na sua cobertura (Figura 7). Devido ao modo de vibração para fora do plano, inseriram-se na cobertura sensores nos pontos médios das paredes, apenas na direção principal para fora do plano. Quanto ao sensor triaxial, por ser o sensor de referência, manteve-se sempre na mesma posição em todas as fases dos testes, orientado segundo as direções X, Y e Z, no canto da cobertura (Figura 7, a verde). É importante que se mantenha um sensor fixo entre leituras uma vez que é com base na posição deste sensor que o programa ARTEMIS [17] sincroniza os diferentes setups.

A distribuição dos acelerómetros foi condicionada pelo seu número, comprimento dos cabos ao sistema central de aquisição e constrangimentos físicos do edifício, nomeadamente na ligação entre pisos e no acesso ao interior das partes/pisos do edifício. No corpo da Sala dos Brasões, por apenas se ter disponível cinco sensores uniaxiais, foi necessário alterar a posição dos mesmos durante várias fases, perfazendo um total de quatro campanhas de ensaios (*setups*) (Figura 7). Tendo em conta o carácter turístico do edifício, este esteve aberto ao público durante os ensaios de vibração ambiental. Assim sendo, optou-se por, em cada setup se realizar três leituras de dez minutos cada. Deste modo, a amostra de resultados é maior e a escolha posterior de *setup*, no pós-processamento, mais fidedigna e segura.

A introdução dos registos obtidos com este ensaio, num modelo geométrico no *software* ARTEMIS permite obter, após processamento, as características dinâmicas principais do edifício.

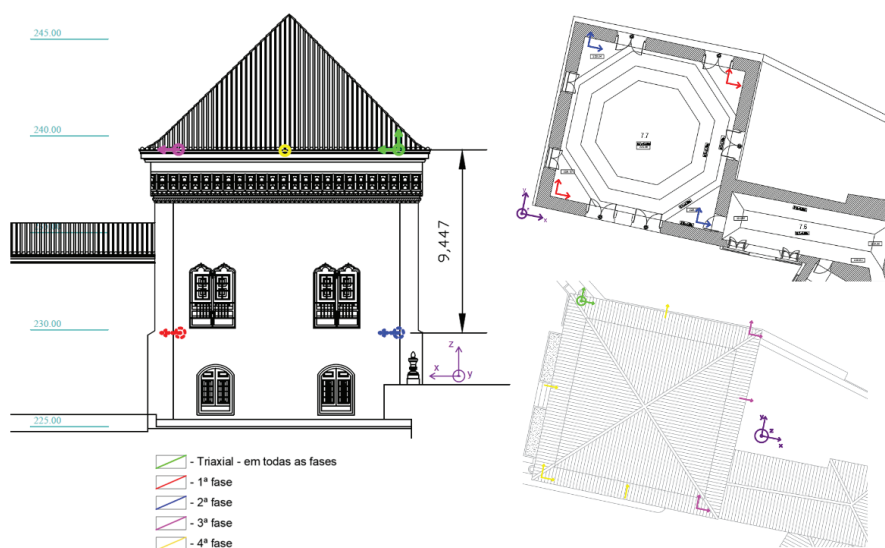


Figura 7 Sensores colocados no corpo da Sala dos Brasões: Alçado Norte (esquerda); piso da Sala dos Brasões (direita, em cima); cobertura da Sala dos Brasões (direita, em baixo).

A modelação no programa ARTeMIS iniciou-se com a definição da geometria da estrutura através de nós, elementos de barra e elementos de superfície. Foi necessário inserir-se um nó em cada ponto onde se realizaram as leituras de acelerações, pois introduziram-se os resultados das medições nas respetivas posições da estrutura segundo a direção e sentido do sensor correspondente. A associação dos registos de acelerações aos nós é ilustrada no modelo final da estrutura através de um vetor no referido nó (Figura 8).

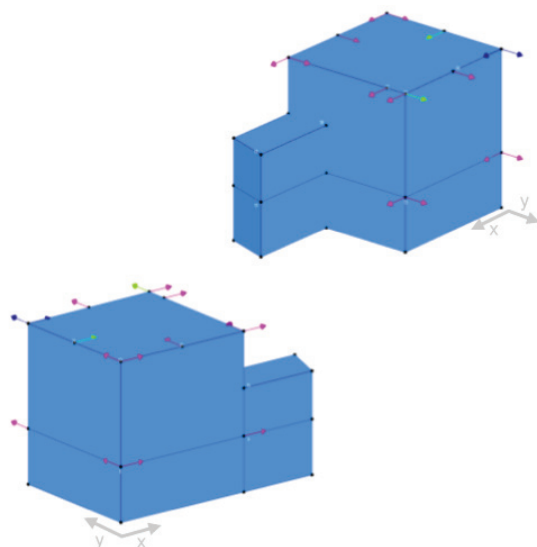


Figura 8 Modelo do corpo da Sala dos Brasões no programa ARTeMIS com registos dos testes vibratórios

Procedeu-se a fase de processamento dos sinais que se registaram e, por fim, efetuou-se a identificação modal através da aplicação

do método de decomposição no domínio da frequência (FDD – *Frequency Domain Decomposition*). Posteriormente, melhoraram-se os resultados utilizando-se o método EFDD – *Enhanced Frequency Domain Decomposition*. Salienta-se que ambos os procedimentos, implementados no programa ARTeMIS, são igualmente denominados por métodos de seleção de picos, uma vez que permite a identificação das frequências naturais de vibração do sistema através dos picos de amplitude das funções de densidade espectral de resposta do sistema [18].

Deste modo, determinaram-se os três modos de vibração fundamentais do corpo da Sala dos Brasões (Figura 11), apresentando-se na Tabela 1 os respetivos valores de frequências e períodos.

Tabela 1 Valores de frequências e períodos dos primeiros modos de vibração obtidos através do ARTeMIS

Modo de vibração	Frequência (Hz)		Período (s)	
	FDD	EFDD	FDD	EFDD
1.º Modo Y	3,80	3,80	0,263	0,264
1.º Modo X	4,07	4,02	0,246	0,249
Torção	5,74	5,74	0,174	0,174

5 Avaliação sísmica

5.1 Procedimento

A realização de uma avaliação sísmica completa e adequada do corpo com a Sala dos Brasões, assim como de todo o Palácio, implica a adoção de um estudo multidisciplinar, envolvendo as áreas de estruturas, construção e materiais, topografia, arquitetura e história,

como indicado nas recomendações de [9, 10] e nas diferentes etapas da abordagem interdisciplinar (ver Figura 1).

A segurança estrutural do edifício engloba diferentes abordagens de modo a atender ao comportamento das paredes no plano e fora do plano. Em ambas as abordagens utilizou-se o programa 3MURI [11]. A avaliação do desempenho global foi realizada com recurso a análises estáticas não lineares, seguindo o que está preconizado na Parte 1 do Eurocódigo 8 (EC8-1) [12] e na Parte 3 do Eurocódigo 8 (EC8-3) [13]. As análises fora do plano realizaram-se sempre que foram identificadas situações onde seria provável a ocorrência de mecanismos parciais associados ao comportamento das paredes para fora do plano. A escolha adequada dos mecanismos de colapso apresenta complexidade, requerendo experiência, formação específica e uma inspeção rigorosa *in situ*.

5.1.1 Avaliação global

Considerando o tamanho e a complexidade do Palácio, a modelação por macro-elementos (modelo de pórticos equivalentes) é a ferramenta adequada para a avaliação sísmica do monumento, tendo em conta o comportamento das paredes no seu plano. Assim, o comportamento sísmico do PNS foi avaliado através da realização de análises estáticas não lineares com recurso, na grande maioria dos corpos, ao programa 3MURI. No modelo de pórticos equivalentes cada parede de alvenaria é discretizada por um conjunto de painéis (pilares - nembos e vigas - lintéis), nos quais a resposta não linear é concentrada, ligados por uma área rígida (nós) onde o dano não ocorre.

Os elementos constituintes de um pórtico equivalente no 3MURI são elementos tipo viga não-lineares (Figura 9), para os quais se destacam as seguintes características:

- 1) Rigidez inicial dada pelas propriedades elásticas;
- 2) Comportamento bilinear com valores máximos de corte e momento fletor calculados no estado limite último;
- 3) Colapso do elemento ao atingir o deslocamento relativo normalizado (*drift*) último δ_u baseado do mecanismo de rotura da Norma Italiana [14] e da Parte 3 do Eurocódigo 8 (EC8-3) [13] – equação (1).

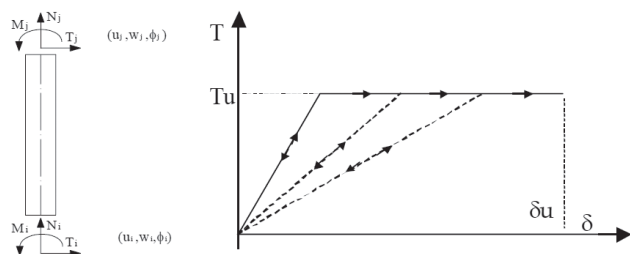


Figura 9 Comportamento não linear dos elementos viga [11]

$$\delta_u = \begin{cases} 0,005 - \text{Corte} \\ 0,01 - \text{Compressão e flexão} \end{cases} \quad (1)$$

É importante realçar que a avaliação sísmica do corpo com a Sala dos Brasões do PNS, como de todos os outros corpos [2, 4], foi realizada

tendo sempre em conta o efeito dos diferentes edifícios adjacentes. Antes de se realizar as análises não-lineares, o modelo numérico foi calibrado com base nos resultados experimentais. Assim, a primeira parte do processo de modelação numérica foi realizada calibrando o modelo tendo sempre como referência as características dinâmicas identificadas com recurso a ensaios de vibração ambiental.

Neste caso de estudo adotaram-se dois tipos de distribuição de forças horizontais para a realização das análises estáticas não lineares: uniforme e pseudo-triangular (produto da massa pela altura). A distribuição uniforme é proporcional à massa dos pisos do edifício, enquanto que a distribuição pseudo-triangular é proporcional ao produto entre a massa e a altura de cada piso.

O desempenho sísmico global da estrutura foi avaliado através do deslocamento objetivo (d_t^*), ou seja, o deslocamento da estrutura quando sujeita a uma ação sísmica, que é comparado posteriormente com o deslocamento último da estrutura. De acordo com o Anexo Nacional do EC8-3, os Estados Limites (EL) a considerar para este tipo de estruturas (classe de importância III) são: (i) de Colapso Iminente (NC); (ii) de Danos Severos (SD); e (iii) de Limitação de Dano (DL). Para que o edifício esteja em conformidade com o nível de desempenho associado a estes Estados Limites, o deslocamento objetivo (d_t^*) não pode ser superior ao deslocamento último da estrutura (d_u^*), ou seja, o deslocamento imposto pelo sismo não poderá ultrapassar a capacidade da estrutura (i.e. $d_u^*/d_t^* > 1$).

5.1.2 Avaliação local

O comportamento local dos mecanismos de colapso para fora do plano foi avaliado através de análises cinemáticas não-lineares de acordo com a abordagem de modelação por macro-bloco. Cada mecanismo foi definido tendo em conta: (i) o conhecimento do comportamento sísmico de estruturas análogas já danificadas em sismos; (ii) qualidade das ligações entre paredes de alvenaria e outras condições de apoio; (iii) a presença de tirantes; e (iv) as interações com outros elementos da construção ou dos edifícios adjacentes. Considerando que alguns dos mecanismos em estudo estão localizados nos níveis superiores dos edifícios, a ação sísmica foi definida através de um espectro de resposta ao nível do piso que tem em conta o efeito dinâmico dos edifícios.

Efetuuou-se a verificação da segurança dos diferentes mecanismos comparando os valores de aceleração sísmica espectral de ativação do mecanismo (a_0^*) com a aceleração espectral do espectro de resposta avaliada para período T zero, ($T = 0, a_{0-\min}^*$), adequadamente amplificada de modo a considerar a altura relativa da porção da estrutura envolvida no mecanismo, de acordo com o preconizado em [14].

5.2 Modelação numérica

Como referido anteriormente, o edifício que contém a Sala dos Brasões foi inicialmente desenvolvido no programa SAP2000 (Figura 6). Posteriormente, para a avaliação do desempenho sísmico a partir de análises não lineares, foi desenvolvido o modelo numérico apresentado na Figura 10, com recurso ao programa 3MURI.

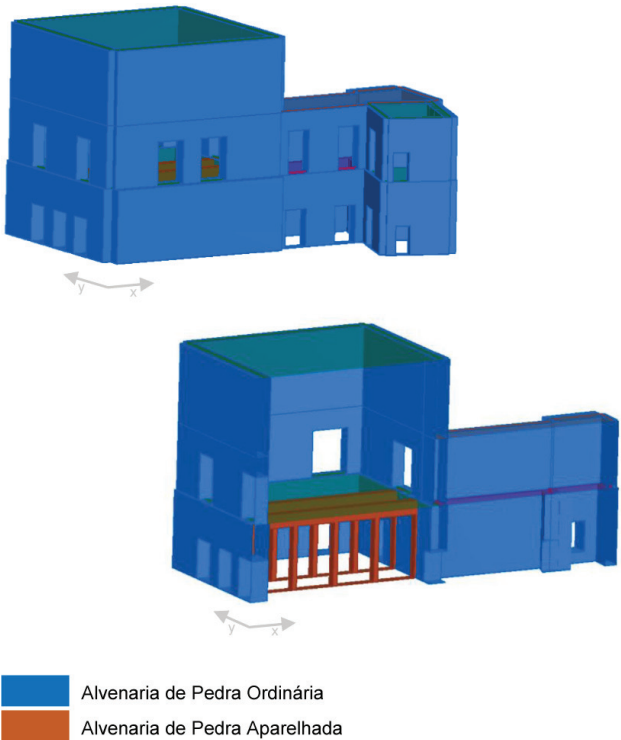


Figura 10 Diferentes vistas do modelo não linear do edifício que contém a Sala dos Brasões elaborado no programa 3MURI

A modelação numérica do edifício que contém a Sala dos Brasões implica a definição da geometria dos elementos estruturais (já definidos na secção 3), as propriedades dos materiais que os caracterizam e as cargas que atuam na estrutura.

Os pavimentos do Edifício dos Brasões são em madeira, com diferentes tipos de revestimento, com acabamentos de madeira ou tijoleira. As paredes são constituídas por alvenaria de pedra ordinária com cal aérea e a estrutura da cobertura é em madeira, caracterizada por um conjunto de asnas.

A massa dos elementos que caracterizam o modelo numérico constitui uma característica importante para a caracterização dinâmica do edifício. A massa dos elementos estruturais foi calculada automaticamente pelo programa através do peso volumico e dimensões dos diferentes elementos. Adicionalmente, aplicaram-se cargas (e consequentemente massas) referentes ao peso próprio, restantes cargas permanentes, sobrecarga do piso (sala de exposição – Sala dos Brasões) e da cobertura do corpo da Sala dos Brasões, de acordo com a Parte 1 do Eurocódigo 1 [19], as Tabelas Técnicas [20] e um estudo realizado na Capela do Palácio Nacional de Sintra [21].

Os valores finais das propriedades mecânicas dos materiais dos elementos estruturais (valores médios) que caracterizam o edifício que contém a Sala dos Brasões estão definidos na Tabela 2. Os valores adotados começaram por ser definidos tendo por base os valores propostos no regulamento italiano [14] e, para a alvenaria de tijolo,

no estudo elaborado em edifícios constituídos por alvenaria de pedra na cidade de Lisboa [22]. A definição dos valores finais (Tabela 2) foi realizada calibrando os modelos numéricos desenvolvidos tendo em conta os resultados que se obtiveram nos testes de caracterização dinâmica. É importante referir que o processo de calibração dos modelos numéricos foi moroso, começando-se por ter em conta os efeitos dos edifícios adjacentes, a definição muito cuidada da geometria do edifício a partir do levantamento por varrimento laser e, finalmente, o ajuste das propriedades mecânicas dos materiais (principalmente o módulo de elasticidade (E) da alvenaria de pedra ordinária).

Tabela 2 Valores de frequências e períodos dos primeiros modos de vibração obtidos através do ARTEMIS

Material	Módulo de elasticidade $E_{fissurado}$ (GPa)	Módulo de distorção $G_{fissurado}$ (GPa)	Peso volumico (KN/m ³)	Resistência à compressão f_m (MPa)	Resistência à tração* f_t (MPa)
Alvenaria de Pedra Ordinária	1,20	0,40	18	2,35	0,041
Tijolo	0,96	0,32	16	1,18	0,088
Alvenaria de Pedra Aparelhada	3,20	1,07	22	8,00	0,120

* A resistência ao corte τ na ausência de compressão (coesão) é definida a partir da resistência à tração: $\tau = f_t/1,5$

Nas análises estáticas não lineares realizadas com o programa 3MURI multiplicaram-se os módulos de elasticidade e de distorção (indicados na Tabela 2) por 0,66 como sugerido em [23].

É ainda de salientar que para as construções existentes, o EC8-3 [13] define que, consoante o grau de conhecimento da estrutura, é necessário reduzir as propriedades mecânicas dos materiais através de um fator de confiança. Para o caso em estudo, adotou-se o nível de conhecimento limitado KL2 (Conhecimento Normal), uma vez que foram realizados ensaios experimentais em alguns corpos do Palácio de modo a conhecer as propriedades mecânicas dos materiais, diminuindo as suas incertezas, mas sem as eliminar por completo. De acordo com o nível de conhecimento limitado, os valores das tensões resistentes à compressão, à tração e ao corte dos materiais (Tabela 2) foram divididos por 1,2.

Os valores das frequências e os correspondentes modos de vibração do edifício calculados no SAP2000 e no 3MURI, através da análise modal, e a sua comparação com os valores determinados experimentalmente, são apresentados na Tabela 3 e Figura 11. A primeira frequência corresponde à vibração do Edifício dos Brasões na direção Y, a segunda à vibração segundo a direção X e a terceira ao modo de vibração de torção. O erro entre os valores experimentais e numéricos das frequências é adequado (não excedendo os 10%, valor considerado aceitável).

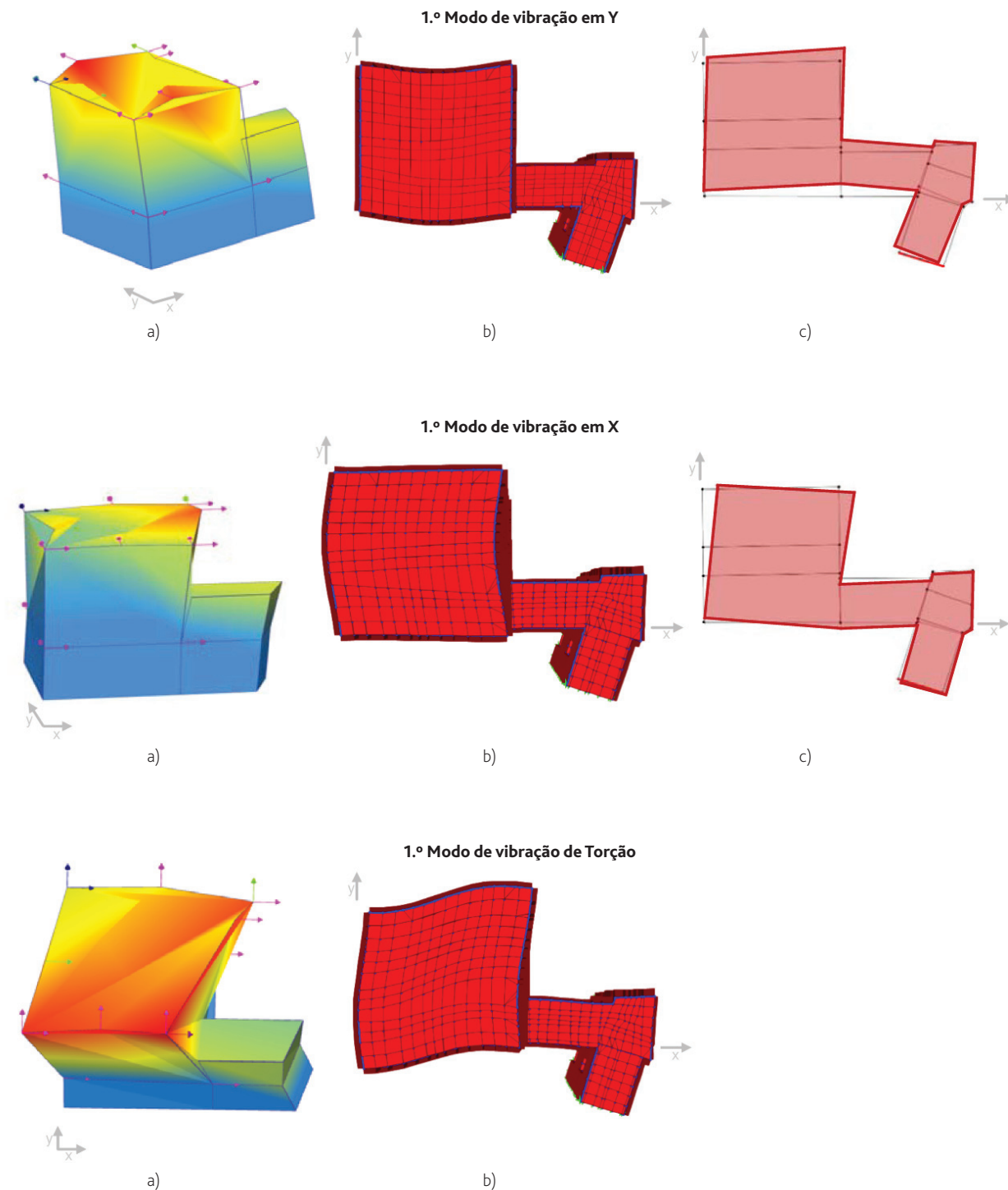


Figura 11 Deformadas dos primeiros modos de vibração nos modelos numéricos do Edifício dos Brasões desenvolvidos nos programas: a) ARTEMIS, b) SAP2000, c) 3MURI

Tabela 3 Valores de frequências e massas modais efetivas direcionais dos primeiros modos de vibração fundamentais do corpo da Sala dos Brasões, identificando-se a percentagem de erro em relação aos valores de referência

Modo de vibração	Modelo ARTeMIS			Modelo SAP2000			Modelo 3MURI			
	f (Hz)	f (Hz)	Erro (%)	Massas modais		f (Hz)	Erro (%)	Massas modais		
				%X	%Y			%X	%Y	
1º Modo Y	3,795	3,520	7	0	30,60	3,700	3	0	33,10	
1º Modo X	4,016	4,064	1	28,30	0	4,097	2	29,70	0	
Torção	5,737	5,315	7	0,35	0,01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	

5.3 Avaliação sísmica

A avaliação sísmica compreende a realização de análises estáticas não lineares (*pushover analyses*), que têm em conta o comportamento global da estrutura, e análises cinemáticas de acordo com a abordagem de modelação por macro-bloco para o estudo do comportamento local dos mecanismos de colapso das paredes para fora do plano. Para a avaliação da segurança sísmica do edifício foi necessário definir-se a ação sísmica, de acordo com a Parte 1 e a Parte 3 do Eurocódigo 8 [10 e 11].

5.3.1 Análise estática não linear

Na Figura 12 apresentam-se as curvas de capacidade resistente da estrutura, para ambos os carregamentos considerados, direções e sentidos, resultantes da análise *pushover*. Estas curvas representam a força de corte basal, normalizada ao peso do edifício em função do deslocamento do último piso, na direção de análise, normalizado à altura do edifício. É importante referir que o nó de controlo para estruturas caracterizadas por diafragmas flexíveis deve ser representativo dos deslocamentos do edifício durante um sismo. Assim, este deve estar localizado no piso superior e corresponder ao nó no topo da parede mais vulnerável; no entanto, os valores de

deslocamentos representados na curva de capacidade representam os valores do deslocamento médio de todos os nós do piso superior ponderados pelas suas massas.

Nas curvas de capacidade resistente da estrutura está identificado o deslocamento último (corresponde ao valor máximo da curva), definido tendo em conta o colapso do edifício em estudo.

Conclui-se através das curvas de capacidade que o carregamento triangular é o mais condicionante e a direção X a que apresenta maior resistência e rigidez. Este facto é de fácil compreensão, tendo em conta que a estrutura é restringida longitudinalmente pelas salas adjacentes à Sala dos Brasões.

É também importante salientar que o colapso se dá sempre por corte independentemente do tipo de carregamento [2, 4]. Na Figura 13 apresentam-se os padrões de danos da estrutura no seu colapso (i.e. quando a estrutura atinge o valor do deslocamento último, d_u) para o carregamento condicionante na direção X e Y, respetivamente. O carregamento segundo Y gera o colapso dos elementos no piso inferior segundo a direção do carregamento, enquanto que o carregamento segundo X gera o colapso dos elementos no piso superior segundo a direção do carregamento.

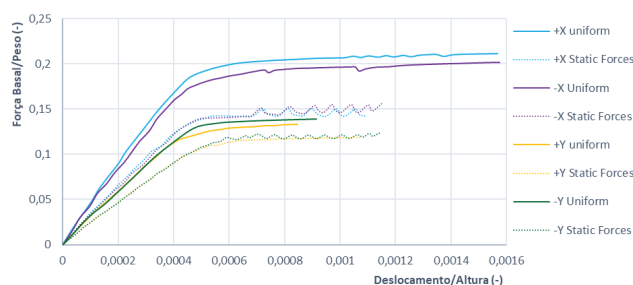
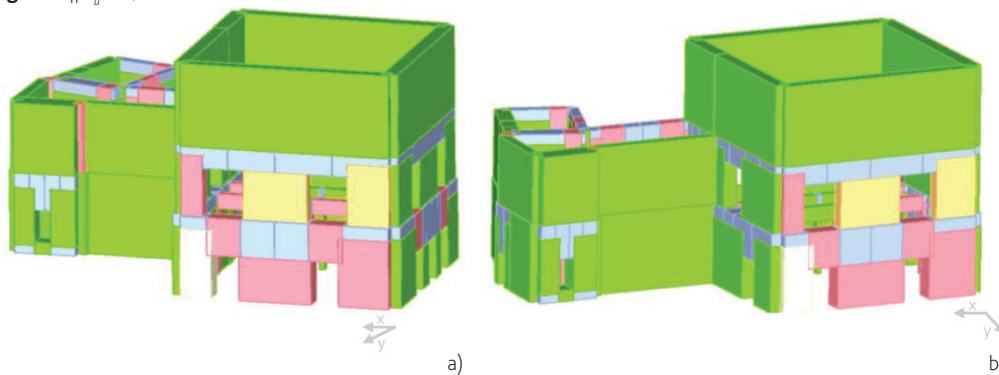


Figura 12 Curvas de capacidade resistente do corpo da Sala dos Brasões para as direções X e Y, até ao deslocamento último

Toda a análise desenvolvida no programa 3MURI, a identificação da distribuição de danos nas paredes à medida que se realizaram as diferentes análises *pushover*, a verificação de segurança para os diferentes estados limites [2] e a distribuição de danos quando se atinge o valor do deslocamento último, possibilitou a identificação das paredes mais vulneráveis do corpo da Sala dos Brasões, identificadas na Figura 14.

X negativo || $d_u = 0,0166$ m



Y negativo || $d_u = 0,0165$ m

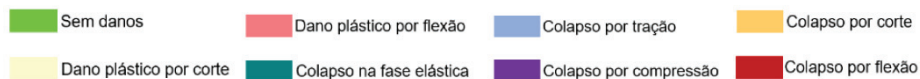
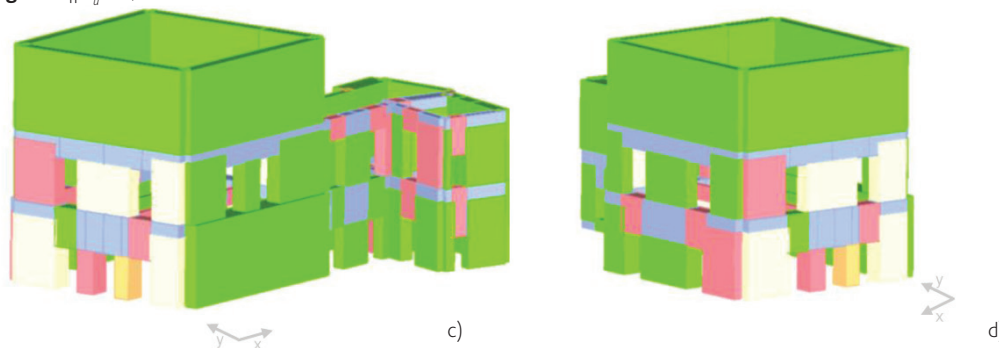


Figura 13 Padrões de danos de colapso para um carregamento pseudo-triangular, a) e b) segundo a direção X negativa e c) e d) segundo a direção Y negativa. Vista alçado norte (imagens à esquerda) e vista alçado este (imagens à direita) do corpo da Sala dos Brasões

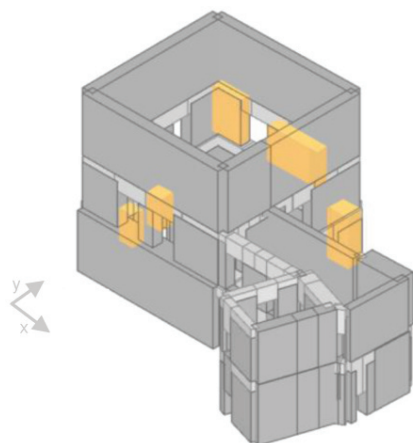


Figura 14 Modelo no programa 3MURI com identificação das paredes mais vulneráveis

5.3.2 Mecanismos locais de colapso para fora do plano

Identificam-se na Figura 15 os mecanismos de colapso estudados no edifício dos Brasões, com maior probabilidade de ocorrência tendo em conta a geometria da estrutura e a análise cuidada do edifício *in situ*. Os mecanismos de colapso encontram-se apresentados do mais vulnerável (Figura 15-1) para o que apresenta a maior capacidade resistente (Figura 15-7). Como anteriormente referido, os mecanismos identificados foram avaliados através do programa 3MURI, para o Estado Limite de Colapso Iminente, para o sismo do tipo 1 e tipo 2, $a_0^* > a_{0-min}^*$.

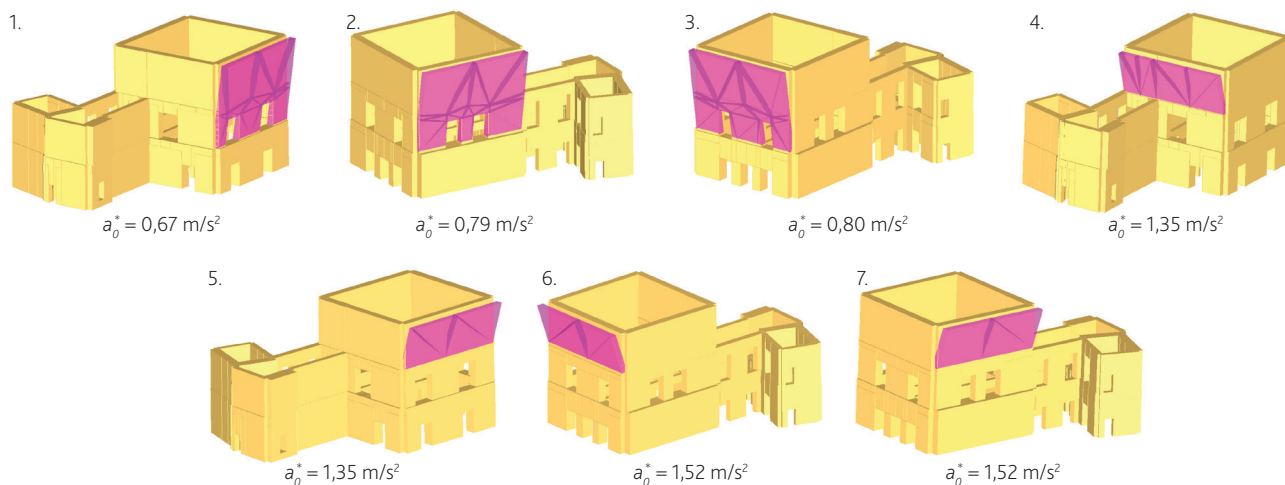


Figura 15 Mecanismos de colapso para fora do plano nas paredes do corpo da Sala dos Brasões. Identifica-se para cada mecanismo a aceleração sísmica espectral de ativação do mecanismo (a_0^*) para o sismo condicionante (tipo 1)

6 Comentários finais

O estudo desenvolvido para a avaliação sísmica do PNS, em geral, e o corpo da Sala dos Brasões, em particular, recorreu a uma abordagem multidisciplinar que contemplou os seguintes passos principais:

- Levantamento em campo da estrutura, que contemplou o levantamento geométrico por varrimento laser;
- Pesquisa, compilação e análise de dados históricos relevantes para a caracterização geral da construção;
- Definição da campanha experimental, que incluiu a identificação dinâmica da estrutura através da realização de testes de vibração ambiental;
- Modelação numérica e calibração dos modelos desenvolvidos;
- Avaliação sísmica, recorrendo a análises não lineares.

A campanha experimental definida para o Palácio Nacional de Sintra permitiu o levantamento geométrico do mesmo e a caracterização das alvenarias que o definem, constituídas por argamassa de cal aérea e, maioritariamente, por blocos de pedra [2, 4]. Realizaram-se a caracterização das alvenarias através de diversos ensaios experimentais *in situ* em alguns corpos do PNS, complementares entre si: testes não destrutivos (detecção geofísica por georadar e a identificação dinâmica da estrutura) e testes semi-destrutivos (recolha de amostras de alvenaria e testes de macacos planos).

No corpo da Sala dos Brasões não se efetuaram testes semi-destrutivos nem os testes de detecção geofísica por georadar. No entanto, os resultados obtidos nos outros corpos e a história construtiva do PNS permitiram definir os valores de partida para a caracterização mecânica dos materiais existentes. A identificação dinâmica do corpo da Sala dos Brasões foi realizada a partir da realização de testes de vibração ambiental. Estes resultados demonstraram ser cruciais para a calibração dos modelos numéricos desenvolvidos.

A avaliação sísmica do corpo da Sala dos Brasões contemplou

duas abordagens diferentes para atender ao comportamento das paredes no plano e fora do plano. Este estudo permitiu verificar a sua segurança [2, 6] e identificar os elementos estruturais mais vulneráveis. Por razões de confidencialidade, os resultados finais do estudo não são aqui apresentados.

Agradecimentos

O estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto “Avaliação da segurança sísmica do Palácio Nacional de Sintra: identificação de anomalias estruturais e dos fatores de vulnerabilidade”, coordenado pela segunda autora, IST, e promovido pela Parques de Sintra – Monte da Lua, S.A. As autoras agradecem às equipas do IST e PSML envolvidas no projeto.

Referências

- [1] Bento, R. (2019 – Avaliação sísmica do património cultural construído: uma abordagem interdisciplinar. *Construção Magazine, Revista Técnico-científica de Engenharia Civil*, 91, 26-11.
- [2] Bento, R.; Ponte, M. (2019) – *Avaliação da segurança sísmica do Palácio Nacional de Sintra: identificação de anomalias estruturais e dos fatores de vulnerabilidade*. Relatório CERIS EP n.º 6/2019 (confidencial), CERIS-IST, Lisboa, Portugal.
- [3] Bento, R.; Godinho, M.; Machete, R.; Silva, J.; Ponte, M.; Falcão, A.P.; Gonçalves, A. (2020) – *Desenvolvimento de um Modelo BIM para Gestão de Informação e Apoio a Projetos, Obras e Manutenção de Património Construído, com base em levantamentos Laser Scanning*. Relatório CERIS EP n.º 08/2020, CERIS-IST, Lisboa, Portugal.
- [4] Ponte, M.; Bento, R.; Silva, D.V. (2019) – A multi-disciplinary approach to the seismic assessment of the National Palace of Sintra. *International Journal of Architectural Heritage, Conservation, Analysis, and Restoration*, Taylor & Francis.
Doi: <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1648587>.

- [5] Godinho, M.; Machete, R.; Ponte, M.; Falcão, A.P.; Gonçalves, A.; Bento, R. 2019 – *BIM as a resource in heritage management: An application for the National Palace of Sintra, Portugal*, Cultural Heritage, Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.010>.
- [6] Silva, A. (2019) – *O Edifício dos Brasões do Palácio Nacional de Sintra. Caracterização e Avaliação do Desempenho Estrutural*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Confidencial), Perfil de Estruturas. Orientador: Rita Bento, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- [7] Ferreira, M. L. (2019) – Obtido de Observador: https://observador.pt/especiais/um-passeio-pelos-corredores-ocultos-do-palacio-nacional-de-sintra/?fbclid=IwAR0zNSsZavqM_iar7YDx8Moiab070nZk7wMSBT9gaQuPcrPyjiriKo8g90, acessado a 25 Agosto de 2019.
- [8] Silva, J. C. (2003) – *O Palácio Nacional de Sintra*. Scala Publishers Ltd.
- [9] ISO 13822. (2010) – *Basis for design of structures: Assessment of existing structures*. Switzerland: ISO.
- [10] ICOMOS/ISCARSAH Committee. (2005) – *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. ICOMOS International Committee for the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage.
- [11] 3MURI (versão 11.5). (2018) – Italy: S.T.A. Data.
- [12] CEN. (2010) – NP EN 1998-1: Eurocódigo 8 – *Projecto de Estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios*. Bruxelas: Instituto Português da Qualidade. European Committee for Standardization.
- [13] CEN. (2017) – NP EN 1998-3: Eurocódigo 8 – *Projecto de estruturas para resistência ao sismo. Parte 3: Avaliação e Reabilitação de edifícios*. Bruxelas: Instituto Português da Qualidade. European Committee for Standardization.
- [14] MIT. (2009) – *Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008*. (in Italian).
- [15] Milosevic, J.; Simões, A.; Bento, R. (2015) – *Projeto Epi-Cidade. Caracterização Dinâmica Experimental - Edifício na Praceta Afonso Paiva n.º 13, Setúbal*. Lisboa: CERIS, ICIST.
- [16] Kinematics Inc. (2012) – Rock Digitizer – User Manual. Rock Series Documento N.º 300715, Revisão H, Kinematics Inc.
- [17] Structural Vibration Solutions (SVIBS) (2015) – Structural Vibration Solutions, ARTEMIS Modal Pro, versão 4.0.
- [18] Ventura C.; Lord, J.; Simpson, R. (2002) – Effective use of Ambient Vibration Measurements for Modal Updating of a 48 Storey Building in Vancouver, Canada. Proceedings of the International Conference on Structural Dynamics Modeling - Test, Analysis, Correlation and Validation, Funchal, Portugal.
- [19] CEN. (2009a) – NP EN 1991-1-1: Eurocódigo 1 – *Ações em estruturas. Parte 1-1: Ações Gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*. Bruxelas: Instituto Português da Qualidade. European Committee for Standardization.
- [20] Farinha, J.S.; Reis, A.C. (1993) – *Tabelas Técnicas*. Setúbal: Edição P.O.B.
- [21] NCREP_1005P0218. (2018) – *Capela do Palácio Nacional, Sintra. Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural*. NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda., Porto
- [22] Simões, A.G.; Appleton, J.G.; Bento, R.; Caldas, J.V.; Lourenço, P.B.; Lagomarsino, S. (2017) – Architectural and Structural Characteristics of Masonry Buildings between the 19th and 20th Centuries in Lisbon, Portugal. *International Journal of Architectural Heritage*. <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2016.1246624>
- [23] Simões, A.G. (2018) – *Evaluation of the seismic vulnerability of the unreinforced masonry buildings constructed in the transition between the 19th and 20th centuries in Lisbon, Portugal*. PhD Thesis in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

